第 42 卷 第 1 期
2024 年 3 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 42, No. 1
Mar., 2024

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.01.11

射电望远镜基于座架温度的热致指向误差建模

涂 标[1]，付 丽[2,3]，王锦清[2,3]，王 旭[1]，周 磊[1]，刘庆会[2]

(1. 重庆交通大学 土木工程学院，重庆 400074；2. 中国科学院 上海天文台，上海 200030；3. 中国科学院 射电天文重点实验室，南京 210008)

摘要： 温度是影响高频大型射电望远镜性能的关键因素之一。以天马望远镜 (TMRT) 为例，研究了座架节点温度与天线指向之间的关系，提出了基于节点温度的指向误差修正模型构建方法。将指向误差视为座架节点温度的线性组合，以节点的温度灵敏度作为特征条件优化自变量的个数，将北极附近源 2344+8226 的指向测试结果作为样本集，与自变量简化前后的温度模型的效果进行对比。同时，这两种温度模型也进行了有限元分析验证，模型计算和有限元分析结果都与样本集相吻合。为了验证模型的通用性，对比分析了模型简化前后在 4 个季度的表现，结果表明简化后的温度模型预测效果更佳。建立的基于节点温度的指向误差修正模型的快速计算结果，也为座架热致指向误差实时修正提供数据支持。

关 键 词： 射电望远镜；温度传感器；指向误差；温度模型

中图分类号： P111.44　　　**文献标识码：** A

1 引 言

大口径射电望远镜是射电天文学研究中的重要设备，不仅可以帮助天文学家观测到更暗、更遥远的天体，同时也在深空探测方面发挥着至关重要的作用。指向精度是射电望远镜的一个重要指标，它直接关系到望远镜能否充分发挥其性能。通常情况下，为了确保望远镜能够高效地工作，其指向精度应该优于 1/10 半功率波束宽度[1]。望远镜的波束宽度与其口径大小和工作频率成反比关系；随着望远镜口径的增大和工作频率的提高，对指向精度的要求也随之增加。

收稿日期： 2023-05-25；　**修回日期：** 2023-10-23

资助项目： 国家重点研发计划 (2021YFC2203501)；国家自然科学基金 (12273097, 12002069)

通讯作者： 王锦清，jqwang@shao.ac.cn

常规的望远镜指向修正模型补偿了结构重力变形等因素引起的指向误差，但未修正随时间变化的天线结构热变形引起的指向误差。方位-俯仰地平式射电望远镜天线结构包括座架、背架、俯仰结构和撑腿等，其中，天线座架梁的截面尺寸和厚度相对较大，热时间常数较大，是热致指向误差的主要因素[2]。国内外学者针对天线座架热变形引起的指向误差展开了研究。1994 年英国的 Bayley 等人[3]通过温度传感器测量了剑桥大学的 Merlin 32 m 口径射电望远镜座架关键位置温度并分析其对指向的影响，实行了热补偿修正。意大利学者 Ambrosini 等人[4]对 Medicina 32 m 射电望远镜进行热效应研究，分析天线基座梁温度与俯仰轴变形之间的关系，尝试用有限元分析预测倾斜仪读数。SRT (Sardinia Radio Telescope)[5]通过倾斜仪监测温度梯度对座架的作用影响。倾斜仪的测量结果与天文观测结果一致，表明指向误差主要由座架温度梯度引起。国内方面，易乐天等人[6]基于温度测量系统对座架关键点温度和太阳辐射参数进行测量和对座架模型温度场仿真并与结构耦合；同时结合天线结构位移场到天线方位轴偏差的几何关系和实测温度特征数据，实现由实测温度到座架结构变形的快速计算。孔德庆等人[7]通过有限元分析计算了天线座架不同部位热变形引起的轴角测量误差，表明轴角测量误差与日照温度梯度存在非常强的相关性，并提出了基于天线结果温度梯度测量的轴角测量误差修正方法。

前期研究主要以倾斜仪测量和有限元计算分析座架热变形。然而热变形对望远镜指向的影响是随时间变化并持续存在的，倾斜仪本身易受周围复杂的环境和外界振动影响，其抗干扰性较差，而有限元分析则需要准确输入环境和材料参数及大量的计算时间。本文将以天马望远镜 (见图 1) 为例，提出一个基于座架节点温度的指向模型构建方法和优化方法，通过射电源法追踪星体 2344＋8226 实验，对比优化前后的温度模型效果。并用有限元分析辅佐检验温度模型在 TMRT 不同季度下的表现。

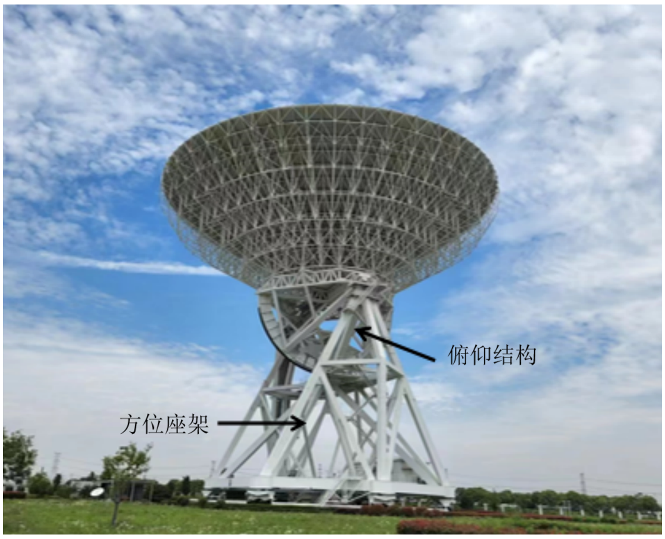

图 1 天马望远镜

2 基于座架温度对指向影响的修正模型

2.1 温度采集系统

天马望远镜的温度采集系统包括温度传感器、主节点控制器、电源、计算机和电缆。系统采用型号为 DS18B20 的数字温度传感器，该温度传感器在 −10℃∼85℃的温度范围内具有 ±0.5℃内的精度。

温度传感器及安装位置如图 2 所示，14 个节点 (方梁) 每个面上分别布置编号为 1—4 的 4 个传感器，例如 1 号节点编号为 1-1、1-2、1-3、1-4。对于每个节点，1 号定义为方梁内侧 (朝向中心枢轴) 上安装的传感器，其他传感器按照顺时针方向依次是 2 号、3 号和 4 号。同时一层平台与二层平台下侧各布一个传感器用以测量空气的温度，共计 58 个传感器。本文中节点温度取为每个节点 4 个面温度传感器记录的温度的平均值。

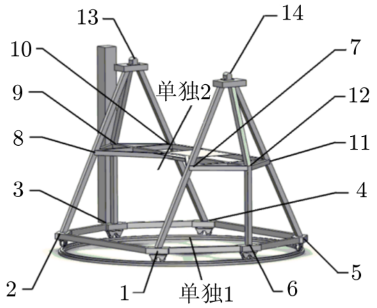

图 2 温度传感器位置及实物图

2.2 温度模型构建原理

实时修正座架热变形所引起的指向误差比较困难，由于座架热变形对指向的影响是具有波动性的，人们难以找到稳定的方法来实时检测热致误差；此外，影响座架热变形的因素异常复杂，指向模型难以全面考虑到影响温度变形的所有因素。基于这些情况，本研究提出一种预测指向误差的温度模型构建方法，通过实时获取座架中少数节点的温度数据，研究座架热变形与指向误差之间的关系。对于 TMRT 而言，指向误差可以近似为座架节点温度的线性组合：

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{M} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix} = \boldsymbol{M} \cdot \boldsymbol{T} \quad , \tag{1}$$

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} \Delta P(t_1) \\ \Delta P(t_2) \\ \vdots \\ \Delta P(t_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1(t_1) \cdots T_1(t_s) \\ T_2(t_1) \cdots T_2(t_s) \\ \vdots \\ T_n(t_1) \cdots T_n(t_s) \end{bmatrix}^{-1} \quad , \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{P}$ 为指向误差，$\boldsymbol{T}$ 向量表示 n 个节点温度组成的列向量，矩阵 $\boldsymbol{M}$ 是向量 $\boldsymbol{T}$ 到 $\boldsymbol{P}$ 的线性映射。具体地，映射矩阵 $\boldsymbol{M}$ 可从实验数据集得到如下估计：$\boldsymbol{T}$ 矩阵由 s 个不同时刻下的 n 个节点温度列向量所组成，TMRT 座架上所测温度的节点共有 14 个，故在本文中 $n \leqslant 14$。而 $\boldsymbol{P}$ 列向量则为由 s 个不同时刻下测得的指向误差构成。具体操作上，$\boldsymbol{T}$ 矩阵的伪逆计算借用 Moore-Penrose 求伪逆方法。然后，将指向误差数据集和温度传感器所测节点温度代入上式，可以计算俯仰模型和方位模型的映射矩阵 $\boldsymbol{M}$。

除此之外，选择合适的自变量数目有助于平衡模型的复杂度和性能。本文采用特征选择法从中挑选出最具信息量的自变量，从而构建简洁高效的模型。此研究针对座架的 14 个节点温度，以节点的温度灵敏度为基准，将模型中关键因素作为自变量予以保留。即在这些节点上施加等温载荷时，将对指向误差的影响最为显著的节点作为自变量。这种简化模型方法减少了温度模型中无效自变量的干扰，同时在模型构建中关注了信息量丰富的节点，以增强模型的可解释性和适用性。

3 温度灵敏度实验

3.1 有限元分析

有限元分析是一种基于数值计算的方法，可以对物体的结构进行模拟和分析，从而得到其应力和变形情况。图 3 为 TMRT 座架和仰角机构的有限元模型。坐标系的原点是方位轴与仰角轴的交点。座架与俯仰齿轮的材料均为钢，弹性模量为 2.06×10^{11} N/m，泊松比为 0.3，密度为 7 850 kg/m^3。边界约束包括两部分：(1) 俯仰轴与座架间的连接通过耦合两部分的三个位移分量和绕轴 Y、轴 Z 的转动分量，只释放绕轴 X 的转动分量，来模拟俯仰机构的转动。(2) 方位座架与地面的连接中，方位中心枢轴约束条件为：约束 X、Y 方向的位移和转角；座架滚轮处约束边界条件为：约束 X、Y、Z 方向位移和转角[10]。

在施加温度荷载时，由于俯仰齿轮与二层平台相近，可假设二层平台所测温度为俯仰齿轮的温度荷载。在有限元分析中，设定初始参考温度为 20℃[11]。图 3 上的数字编号为所对应温度传感器的节点编号，这 14 个节点温度荷载为温度传感器所记录数据的节点温度，利用这已知的 14 个节点温度，采用距离反比加权插值方法[12]获得座架上其余待测节点。距离反比加权插值方法对与待插值点相邻的待定区域内所有已知点进行加权求平均值，来求得待插值点的数值。每个节点的权值由待插值点与该点的距离确定，其大小是距离 k 次方的倒数，可表示为：

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} \dfrac{Z_i}{(d_i + \varepsilon)^k}}{\sum_{i=1}^{n_p} \dfrac{1}{(d_i + \varepsilon)^k}} \quad , \tag{3}$$

式中，Z_p 是待插值点 p 处的温度；Z_i 为插值点领域内传感器 i 的温度；d_i 为待插值点 p 与其邻域内传感器 i 的距离；n_p 为点 p 邻域中传感器数目；k 是距离的方次；ε 是一个比较小的数，取 0.01，这是为了避免 d_i 过小而产生数值奇异。

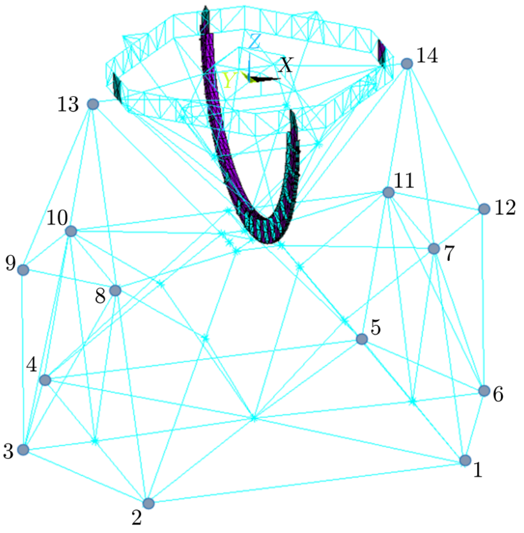

图 3　座架有限元模型

如图 4 所示，座架热变形对仰角指向精度的影响包括两项[13]：座架上向阳面的前腿 A_r 与背阳面的后腿 A_f 的温度差致使两腿之间热膨胀程度不同。由此引起的俯仰轴偏移所带来的误差 $\Delta\varepsilon_1 = U_Y/h$ 来计算，U_Y 为节点 E 沿轴 Y 位移量，h 为座架高度。此外，还导致了“A 字塔”顶部的旋转 ($E\rightarrow E'$: $\Delta\varepsilon_2$)，俯仰轴的旋转误差 $\Delta\varepsilon_2 = ROT_X$，$ROT_X$ 为 E 点绕轴 X 的旋转量。因此，垂直于俯仰轴总倾角 $\Delta\varepsilon_\Sigma = \Delta\varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_2$[9]。同理，方位误差 $\Delta\phi$ 可表示为 $\Delta\phi_\Sigma = \dfrac{U_X}{h} + ROT_Z$，$U_X$ 为节点 E 沿轴 X 位移量，ROT_Z 为点 E 绕轴 Z 的旋转量。

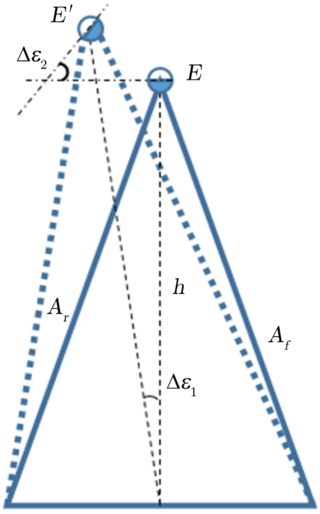

图 4　座架及热变形草图

3.2 实验结果

为了确定座架上哪些节点对指向误差具有最大的影响，本文进行了有限元座架节点温度灵敏度分析。首先，将所有节点的温度荷载设置为 0；然后分别在不同节点上施加 5℃的温度荷载，并计算座架模型在每种情况下的变形引发的指向误差；最后将这些结果进行对比，以确定哪些节点的温度荷载能够对座架的指向误差产生更大的影响。

在有限元模型中，考虑到其中心对称性结构，本文只选取了 1、6、7、12、14 号节点 (见表 1) 进行对比分析。通过对实验数据进行分析发现，施加在 7 号节点的温度荷载无论是在方位误差还是俯仰误差方面，对指向误差的影响都是最显著的。基于此结果，本文选取 7 号节点以及与之对称的节点 8、节点 10 和节点 11 作为温度模型的自变量。

表 1 节点温度灵敏度结果

节点编号	俯仰误差/(″)	方位误差/(″)
1	1.608 24	1.430 64
6	0.206 28	1.018 08
7	7.758 6	2.647 92
12	4.0×10^{-6}	0.812 16
14	0	0

4 温度模型测试

4.1 射电源法

射电源法在检测天线指向误差的应用上已经十分普遍。采用卫星或强射电源扫描法让天线对射电信号进行方位和俯仰扫描，同时检测天线接收到的功率信号；然后利用信号最大值、星体的理论位置以及天线的实际位置，可以准确解出单次扫描数据对应的指向误差[14]。为了研究望远镜指向变化和座架热变形的规律，我们选择观测北极附近的源 2344+8226。由于它全天可见，TMRT 天线方位和俯仰的跨度分别是 20° 和 15° (见图 5)，在这样的小范围内指向误差是差异较小，可以最大程度分辨温度导致的指向误差[15]。我们选择在一个晴天做实验。

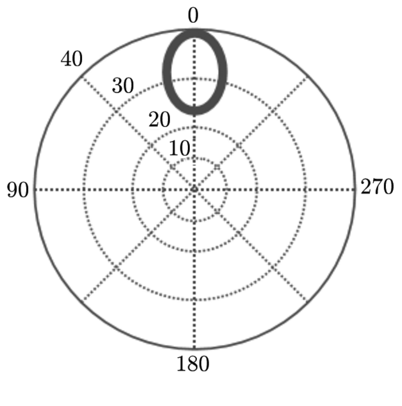

图 5 源 2344+8226 的轨迹

4.2　结果分析

2023 年 3 月 7 日，对星源 2344+8226 进行了 8 h 不间断的十字扫描，同时记录座架上节点温度传感器的数据，并用数据拟合出两种温度模型：温度模型 A 的自变量为温度传感器可测的所有节点，温度模型 B 的自变量仅为由温度灵敏性分析获得的特征节点的温度。将两种温度模型结果进行对比，并用座架温度数据进行有限元分析，从而验证建立的温度模型的准确性和可靠性。

图 6 显示了射电法追踪过程中座架节点温度的变化。通过与图 7 和图 8 中的指向误差变化图对比，可以清晰观察到座架节点温度升高时，无论是俯仰误差还是方位误差，在 14－15 时段都达到了峰值，变化趋势高度一致。这表明座架温度与指向误差之间具有显著相关性。

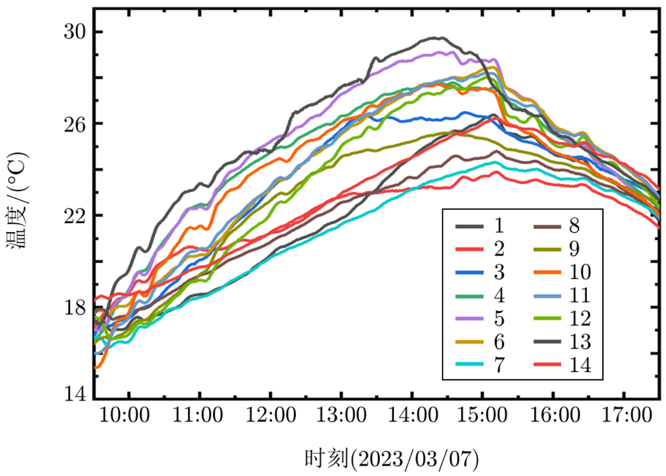

图 6　源 2344+8226 指向实验座架温度变化

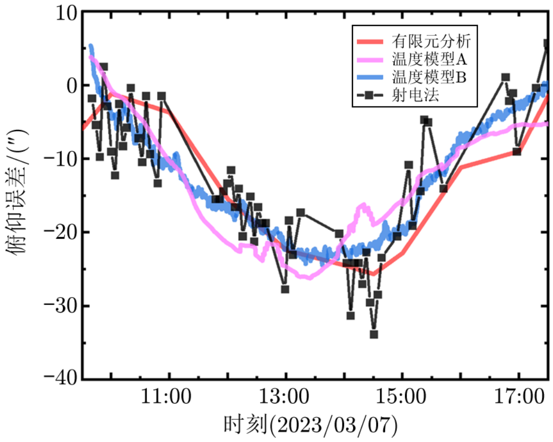

图 7　源 2344+8226 俯仰误差对比

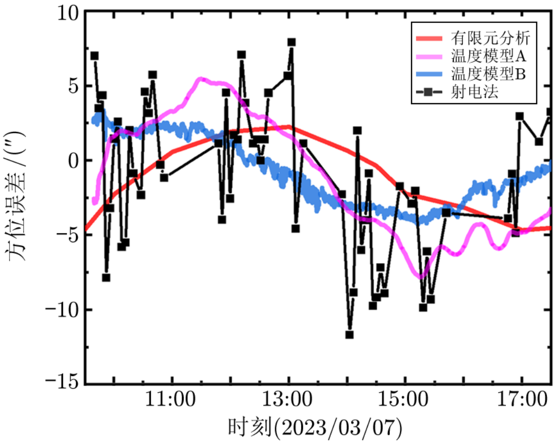

图 8　源 2344+8226 方位误差对比

为了更加客观地验证这一相关性和对比不同温度模型的表现，将指向误差和对节点温度数据结合式 (1) 和式 (2) 通过计算得到以下两种温度模型：

$$\begin{cases} DEL_{\text{A}} = -3.51T_1 + 1.9T_2 - 1.28T_3 - 0.53T_4 - 6T_5 + 5.93T_6 + 3.38T_7 + \\ \qquad 4.04T_8 - 0.75T_9 + 0.3T_{10} + 6.88T_{11} - 6.27T_{12} - 1.5T_{13} - 2.6T_{14} \\ DAZ_{\text{A}} = -2.761T_1 + 0.2T_2 - 0.82T_3 - 0.4T_4 - 1.26T_5 + 1.02T_6 + 0.62T_7 - \\ \qquad 5.48T_8 - 4.7T_9 + 2.79T_{10} - 6.6T_{11} - 2.96T_{12} - 0.72T_{13} - 6.41T_{14} \end{cases} , \quad (4)$$

$$\begin{cases} DEL_{\text{B}} = 6.87T_7 - 0.24T_8 - 0.96T_{10} - 5.46T_{11} \\ DAZ_{\text{B}} = 0.82T_7 - 0.8T_8 - 2.08T_{10} - 3.58T_{11} \end{cases} , \quad (5)$$

其中，DEL_{A} 和 DEL_{B} 分别是温度模型 A 和 B 的俯仰模型，DAZ_{A} 和 DAZ_{B} 分别是温度模型 A 和 B 的方位模型，T_i 为编号 i 上的节点的所测温度，本文所测节点有 14 个，故 $i \leqslant 14$。

由图 7 和图 8 中的数据可知，无论是俯仰误差还是方位误差，两种计算得出的温度模型与射电法测得的结果都呈现出相似的趋势。在同一天内，这两种温度模型展现出优异的预测准确性。为了确保实验结果的可信性，采用有限元分析进行验证。通过在仿真环境中模拟不同温度条件下座架的变形状况，对有限元分析、温度模型以及射电法测量结果进行了对比，验证了这三者之间的一致性。上述结果证实了所建立的温度模型能较好地解释样本集。

5 模型通用性验证

前文通过对星源 2344+8226 的指向进行测试分析，证实了提出的两种温度模型能较好地拟合样本集。随后，为验证这些温度模型普适性，本文随机选择了过去两年内的 4 个季度中的一天数据作为测试样本，使用有限元分析方法对不同季度下模型的有效性进行了评估。将测试样本中的节点温度数据代入温度模型 A 和 B，并将其与有限元分析结果进行比较。

图 9 比较结果显示，在预测俯仰误差方面，两种温度模型与有限元分析结果符合得较好，但温度模型 B 的预测结果与有限元分析结果的偏离小于温度模型 A。然而，在预测方位误差方面，温度模型 A 与有限元分析结果的对比偏离较大且趋势不一致；而温度模型 B 则在大多数情况下与有限元分析结果较符合，尽管温度模型表现结果比有限元分析结果存在一定的滞后性。

结果表明，温度模型 B 在不同季节下能够有效反映座架热致指向误差的趋势；而温度模型 A 在测试样本中的方位误差预测表现欠佳，有明显的偏离趋势。总体上，温度模型 B 在任何实验中的预测度也优于温度模型 A，这个验证结果进一步支持了温度模型简化方法的有效性和优化性，为不同季节和环境下的座架指向误差补偿提供了可靠的方法。

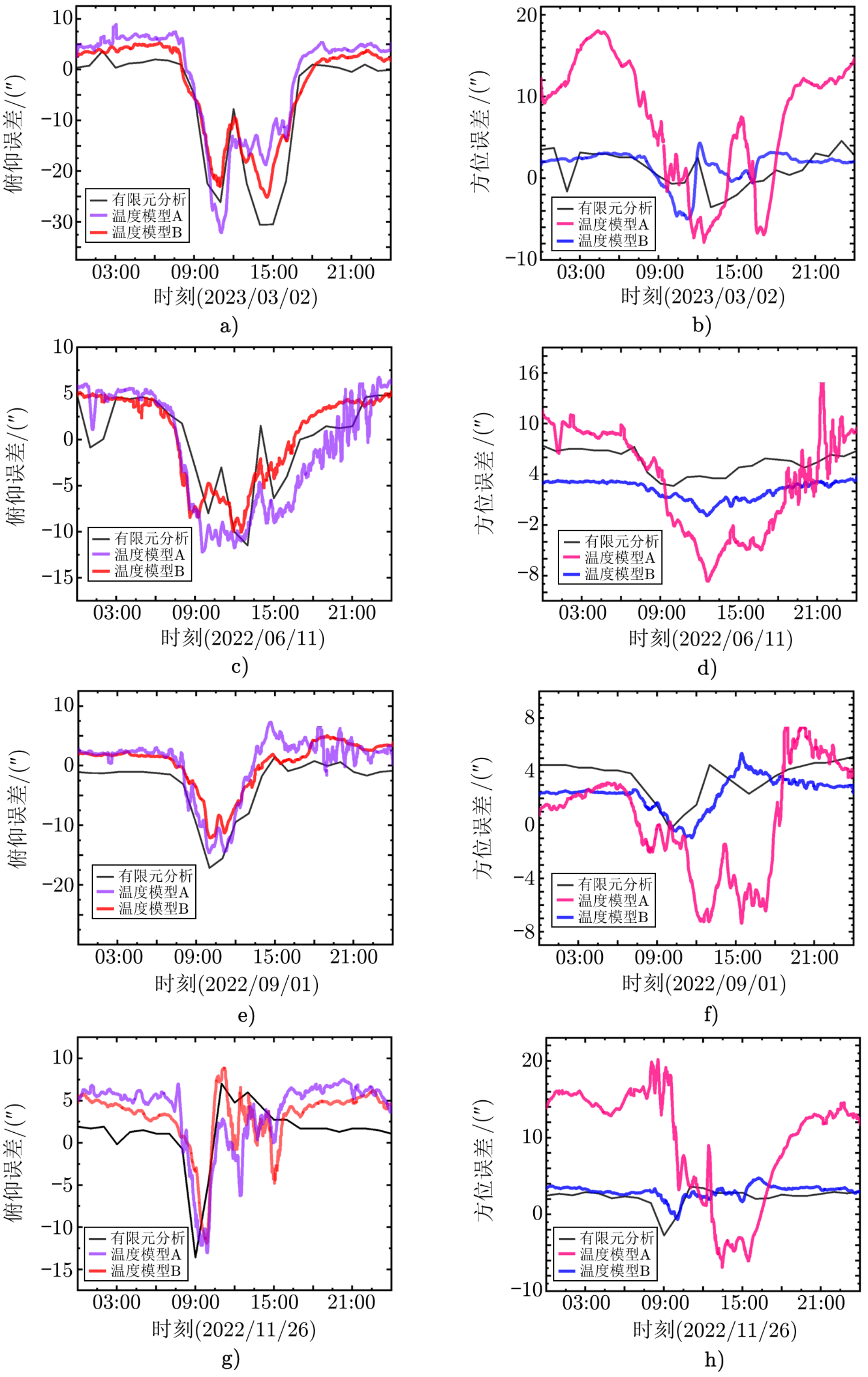

图 9　温度模型验证的结果对比

6 结 论

本文研究了 TMRT 座架温度对指向性能的影响，提出了基于节点温度的指向误差修正模型构建及优化方法。实验证实了简化前后的温度模型的预测拟合样本的可行性。但在不同季节下的分析中，基于特征简化自变量的温度模型比优化前的模型更能准确预测，验证了基于模型构建的简化方法的优化性。这将为补偿座架热致指向误差提供可靠方法，支持 TMRT 在各种季节和环境中的高效观测。座架热变形是天线结构热致指向误差的主要影响因素，下一步研究将考虑背架及副面撑腿等热变形对天线指向精度的影响。未来研究工作可进一步优化温度模型，以提升指向性能的稳定性和准确性。

致谢

感谢中国科学院上海天文台天马观测站工程师们提供的帮助与技术支持。

参考文献：

[1] Levy R. Structural Engineering of Microwave Antennas. New York: IEEE Press, 1996: 52
[2] 虞林峰, 王锦清, 蒋甬斌, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2019, 49(12): 151
[3] Bayley A M, Davis R J, Haggis J S, et al. A&A, 1994, 283: 1051
[4] Ambrosini R, Grueff G, Morsiani M, et al. Ap&SS, 1996, 239: 247
[5] Pisanu T, Buffa F, Poppi S, et al. SPIE, 2014, 9145: 1670
[6] 易乐天, 许谦, 李琳, 等. 天文研究与技术, 2022, 19(05): 438
[7] 孔德庆, 姜正阳, 张洪波, 等. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(11): 1331
[8] Fu L, Ling Q B, Geng X G, et al. SPIE, 2016, 9912: 1408
[9] Fu L, Wang J, Jiang Y, et al. Experimental Astronomy, 2019, 48(1): 49
[10] 付丽, 董健, 凌权宝, 等. 电科科学学报, 2017, 32(03): 314
[11] Fu L, Yu L, Tang J, et al. Research in Astronomy and Astrophysics, 2022, 22(10): 5011
[12] 李旺, 付丽, 王旭, 等. 天文学进展, 2023, 41(02): 292
[13] Greve A, Bremer M. Thermal design and thermal behaviour of radio telescopes and their enclosures, Berlin: Springer Science & Business Media, 2010: 180
[14] 虞林峰, 王锦清, 赵融冰, 等. 天文学报, 2015, 56(2): 165
[15] 王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2017, 47(12): 125

Modeling of Thermally Induced Pointing Error for Radio Telescopes Based on Alidade Temperature

TU Biao[1], FU Li[2,3], WANG Jin-qing[2,3], WANG Xu[1], ZHOU Lei[1], LIU Qing-hui[2]

(1. Chongqing Jiaotong University, School of Civil Engineering, Chongqing 400074, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Temperature is one of the key factors influencing the performance of large-scale radio telescopes. Taking the Tianma Radio Telescope (TMRT) as an example, this study investigates the relationship between the temperature of the alidade's nodes and antenna pointing accuracy. A method is proposed for constructing a correction model for pointing errors based on node temperatures. The pointing error is treated as a linear combination of the alidade's node temperatures. The number of independent variables is optimized using the temperature sensitivity of the nodes as feature conditions. The pointing test results of the source 2344+8226 near the North Pole are used as the sample set to compare the effectiveness of the temperature model before and after variable simplification. Both the model calculations and finite element analysis validate the two temperature models, which align with the sample set. Furthermore, to assess model generalization, the performance of the models is compared across four seasons before and after simplification. The results indicate that the simplified temperature model offers improved predictive accuracy. The established node temperature-based pointing error correction model's rapid calculation outcomes provide data for real-time mitigation of thermally induced pointing errors in the mount.

Key words: radio telescope; temperature sensor; pointing error; temperature model